

5. Yevseiev, S., Rzaev, K., Korol, O., Imanova, Z. (2016). Development of mceliece modified asymmetric crypto-code system on elliptic truncated codes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (9 (82)), 18–26. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75250>
6. Евсеев, С., Цыганенко, А. (2018). Розробка несиметричної крипто-кодової конструкції Нідеррайтера на модифікованих еліптичних кодах. Системи обробки інформації, 2 (153), 127–135. doi: <http://doi.org/10.30748/soi.2018.153.16>
7. Дудикевич, В. Б., Кузнецов, О. О., Томашевський, Б. П. (2010). Крипто-кодовий захист інформації з недвійковим рівновагим кодуванням. Сучасний захист інформації, 2, 14–23.
8. Дудикевич, В. Б., Кузнецов, О. О., Томашевський, Б. П. (2010). Метод недвійкового рівноважного кодування. Сучасний захист інформації, 3, 57–68.
9. De Vries, S. (2016). Achieving 128-bit Security against Quantum Attacks in OpenVPN. Available at: <https://internetscriptieprijs.nl/wp-content/uploads/2017/04/1-Simon-de-Vries-UT.pdf> Last accessed: 01.12.2019
10. Baldi, M., Bianchi, M., Chiaraluce, F., Rosenthal, J., Schipani, D. (2014). Enhanced public key security for the McEliece cryptosystem. Available at: <https://arxiv.org/abs/1108.2462> Last accessed: 01.12.2019
11. Yevseiev, S., Tsyhanenko, O., Gavrilova, A., Guzhva, V., Milov, O., Moskalenko, V. et. al. (2019). Development of Niederreiter hybrid crypto-code structure on flawed codes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (9 (97)), 27–38. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156620>
12. Yevseiev, S., Shmatko, O., Tsyhanenko, O. (2019). Metodologicheskiye osnovy postroyeniya kriptostoykikh kriptosistem Mak-Elisa i Niderraytera na algebrogeometricheskikh kodakh v postkvantovoy kriptografii. 3rd International Symposium on Multi-disciplinary Studies and Innovative Technologies. Ankara.

Received date 12.11.2019

Accepted date 04.12.2019

Published date 30.12.2019

Цыганенко Олексій Сергійович, аспірант, кафедра кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, пр. Науки, 9-А, м. Харків, Україна, 61166
E-mail: oleksii.tsyhanenko@hneu.net

УДК 669.054.82:669.714.82

DOI: 10.15587/2313-8416.2019.189686

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ АЛЮМІНІЄВОГО СКРАПУ

Ф. М. Верховлюк, В. В. Довбенко, І. Ф. Червоний

Представлено аналіз технологій переробки алюмінієвого скрапу з урахуванням економічної та екологічної складових. Розглянуто кислотно-лужний способи, сульфатний і содовий способи, а також електродугової переплав алюмінієвого шлаку в однофазної електродугової печі змінного струму. Відзначається значна кількість проблем, що стосуються механічних і електрофізичних характеристик вироблених виробів. Вирішення цих питань, з урахуванням підвищення вимог споживача, можливо тільки при виконанні спеціальних досліджень в частині вдосконалення технології та розробки пристроїв і установок для проведення нових технологічних процесів

Ключові слова: алюміній, вторинний алюміній, сировина, шлак, пінки, дроби, розплав, електротермічна установка, плавильна піч

Copyright © 2019, A. Verhovlyuk, V. Dovbenko, I. Chervonyi.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

1. Вступ

Алюміній – легкий метал сріблясто-білого кольору, легко піддається формуванню, литтю та механічній обробці. Алюміній має високу тепло- та електропровідність, а також стійкість до корозії. Алюміній є елементом 13-ї групи періодичної таблиці хімічних елементів з атомним номером 13. Алюміній належить до групи легких металів і є найбільш поширеним металом – третій метал за поширеністю хімічних елементів в земній корі (після кисню і кремнію).

Відповідно до довідкових даних [1, 2], вперше алюміній був отриманий датським фізиком Гансом Ерстед в 1825 році. Він відновив хлорид цього елемента амальгамою калію при нагріванні і виділив метал. Пізніше спосіб Ерстеда був поліпшений Фрідріхом Велером, який використовував для відновлення хлориду алюмінію до металу чистий металевий калій, і він же описав хімічні властивості алюмінію.

Напівпромисловим способом вперше алюміній отримав в 1854 р. Сент-Клер Девіль за методом Велера, замінивши калій на більш безпечний натрій. Рік

по тому на Паризькій виставці 1855 року він продемонстрував злиток металу, а в 1856 р отримав алюміній електролізом розплаву подвійної солі хлориду алюмінію-натрію. Промисловий спосіб отримання металу електролізом розплаву Al_2O_3 в криоліті розробили незалежно один від одного Ч. Хол і П. Еру в 1886 р.

До розвитку широкомасштабного промислового електролітичного способу отримання алюмінію з глинозему цей метал був дорожче золота. У 1889 році британці, бажаючи вшанувати багатим подарунком російського хіміка Д. І. Менделєєва, подарували йому аналітичні ваги, у яких чашки були виготовлені з золота і алюмінію.

му аналітичні ваги, у яких чашки були виготовлені з золота і алюмінію.

2. Літературний огляд

В даний час промислове виробництво значно зросло і світовий обсяг виробництва в 2018 р. склав 64,3 млн. т [3]. При цьому прогнозується збільшення обсягу виробництва до 80 млн. т (рис. 1) [4].

На Україні щорічно виробляється 210 тис. т алюмінію. Близько 100 тис. тон проводиться методом вторинного переплавлення алюмінієвого брухту [5].

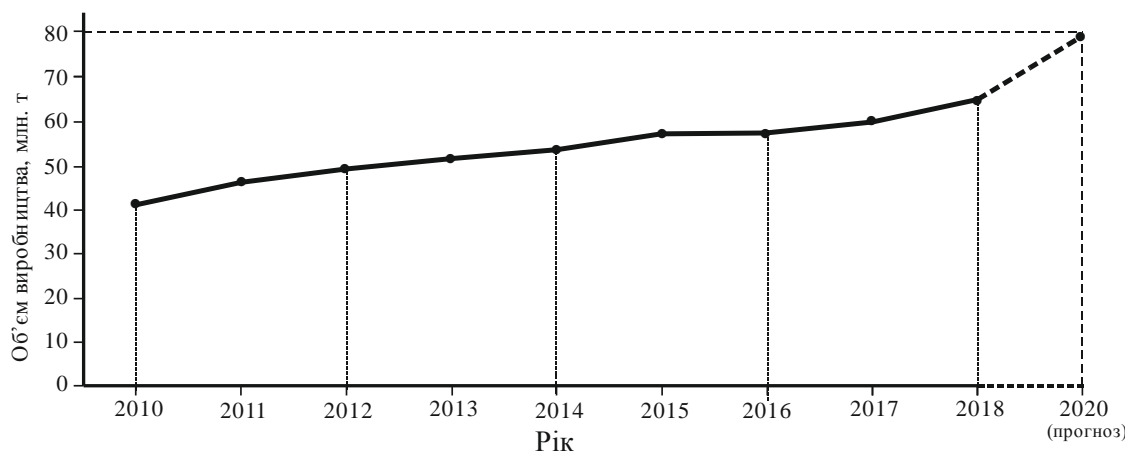


Рис. 1. Світовий обсяг виробництва алюмінію [5]

Постійне зростання обсягу виробництва алюмінію обумовлене розширенням його застосування в народному господарстві і удосконаленням технології отримання чистого алюмінію. Технічний прогрес сприяв високому рівню споживання алюмінію. Галузі застосування алюмінію наведені в табл. 1.

Наведені дані про динаміку розвитку виробництва алюмінію характеризують і динаміку споживання алюмінію на душу населення. Нижче наводиться динаміка споживання алюмінію на душу населення в економічно розвинених країнах (рис. 2).

Таблиця 1

Застосування алюмінію по галузях промисловості [4]

Галузь промисловості	Обсяг застосування, %
Транспорт	26,5
Будівництво	25,3
Упаковка товарів	7,7
Фольга алюмінієва	8,0
Електротехніка	14,2
Споживчі товари	4,5
Машинобудування	9,0
Інші галузі	4,9

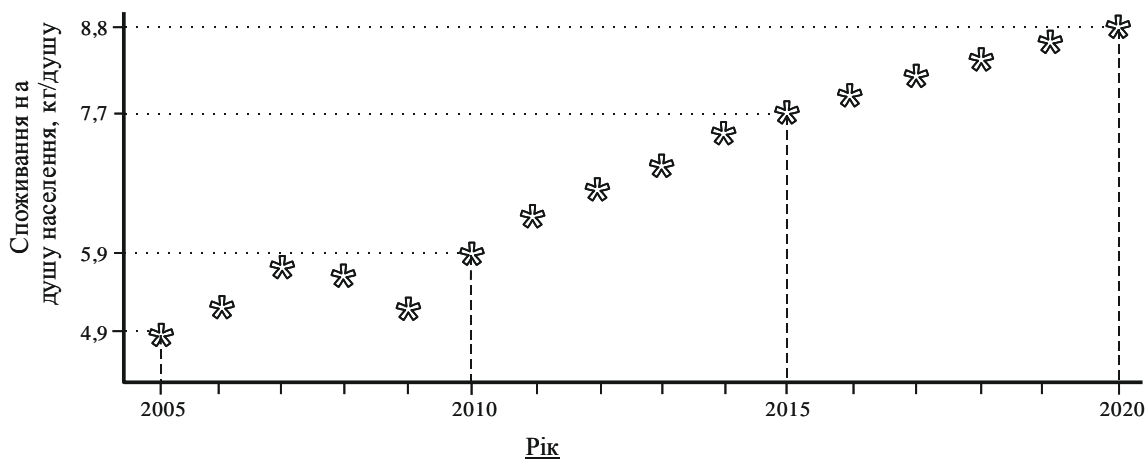


Рис. 2. Споживання алюмінію в економічно розвинених країнах на душу населення [4]

3. Мета і завдання дослідження

Мета дослідження – розглянути методи, що застосовуються для переробки алюмінієвого шлаку і виробити рекомендації оптимальних варіантів технологічного процесу.

Для досягнення мети було поставлено такі задачі:

- виконати аналіз технологій переробки алюмінієвого скрапу;
- виділити переваги і недоліки застосовуваних технологій

4. Технологія алюмінію

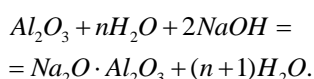
Для забезпечення промисловості і споживчого попиту в даний час алюміній виробляють за двома технологічними напрямками:

- виробництво первинного алюмінію – переробка рудної сировини, яка містить алюміній;
- виробництво вторинного алюмінію – переробка алюмінієвого брухту і відходів з отриманням очищеного алюмінію, який може застосовуватися в різних галузях промисловості і задовольняти споживчий попит.

5. Результати дослідження

Виробництво первинного алюмінію. Основною сировиною для виробництва первинного алюмінію в даний час є алюмінієва руда – боксити. Боксити – це глиниста гірська порода, яка складається з гідроксиду алюмінію з домішкою оксидів заліза, кремнію, титану, сірки, галію, хрому, ванадію, карбонатних солей кальцію, заліза і магнію. При оцінці переробки бокситів встановлено, що на одну тону чистого алюмінію потрібно від 4 до 5 т бокситу.

Найбільш продуктивним способом виробництва глинозему є спосіб Байєра. Спосіб Байєра заснований на вилуговуванні оксиду алюмінію Al_2O_3 за реакцією



Скорочену технологічну схему способу Байєра можна представити таким чином:

- видобуток алюмінієвої руди – бокситу;
- дроблення і мокрий помел бокситу;
- вилуговування бокситу в автоклавах;
- розведення автоклавної пульпи;
- згущення пульпи і відділення червоного шламу (червоний шлам – тверді відходи процесу вилуговування, що містять оксиди металів і елементів; червоний колір створює присутність оксидів заліза);
- отримання освітленого алюмінатного розчину;
- декомпозиція – розкладання алюмінатного розчину з виділенням гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$ в осад (для цього алюмінатний розчин розбавляють водою, з метою зниження концентрації $NaOH$, і охолоджують; при цьому утворюється осад у вигляді дрібних кристалів гідроксиду алюмінію);
- згущення пульпи гідроксиду алюмінію і відділення його від розчину;
- промивка гідроксиду алюмінію;

– кальцинація – процес повного зневоднення гідроксиду алюмінію за високої температури і отримання глинозему – Al_2O_3 ;

– глинозем – Al_2O_3 ;

Отриманий глинозем надається до електролізу для отримання чистого алюмінію.

Слід зазначити одну важливу економічну особливість виробництва алюмінію. Технологічний процес виробництва первинного алюмінію є енергоємним і вимагає значних витрат. Наприклад, в Німеччині для переробки алюмінієвої руди і отримання первинного алюмінію витрачається не менше 15 МВт·год. електроенергії. В інших країнах показник необхідної для споживання енергії може бути значно вище. У той же час при переробці вторинної алюмінієвої сировини витрачається всього 5 % енергії для переробки рудної сировини [6].

Переробка вторинного алюмінію. Вторинний алюміній – це лом і відходи процесу переробки первинного алюмінію. До категорії вторинного алюмінію відносять штучні відходи механічної або ливарної обробки, листи і труби, стружку, а також оборотні шлаки і сплеси (бризки розплаву) [7, 8].

Переробка вторинного алюмінію в даний час виокремилися в самостійну галузь промисловості, яка називається вторинна металургія, а в даному випадку – вторинна металургія алюмінію. Завданням вторинної металургії алюмінію є промислова переробка брухту, відходів, шлаків та інших видів вторинної сировини.

Відповідно до аналітичного огляду світового виробництва і споживання алюмінію, в даний час обсяг виробництва вторинного алюмінію складає приблизно 30 % від загального світового виробництва алюмінію. При цьому наголошується, що частка вторинного алюмінію продовжує збільшуватися [9, 10].

Переробка вторинного алюмінію включає два етапи:

- на першому етапі проводять сортування вторинної сировини, сушку брухту і відходів, стружки, флюсів, шлаків та інших видів вторинної сировини;
- на другому етапі проводиться металургійна переробка вторинної сировини, яка включає плавку в плавильних печах.

Види вторинного алюмінієвого сировини наведені на рис. 3 [10].

На першому етапі особлива увага приділяється очищенню брухту і відходів від механічних забруднень і оксидів. При цьому проводиться сепарація брухту і відходів за видами вторинної алюмінієвої сировини. Застосування технології дроблення дозволяє проводити подрібнення брухту і відходів та проводити механічну або магнітну сепарацію. Для виконання операції дроблення і подрібнення застосовують різноманітні різні конструкції дробарок.

Найбільшого поширення набули конусні, молоткові і ножові дробарки. Застосовуються також і млини для послідовного дроблення, і подрібнення матеріалу. Зменшується час сушіння матеріалу видаляє вологу з поверхні матеріалу і забезпечує зниження втрат вторинної сировини і підвищує безпеку металургійної плавки.

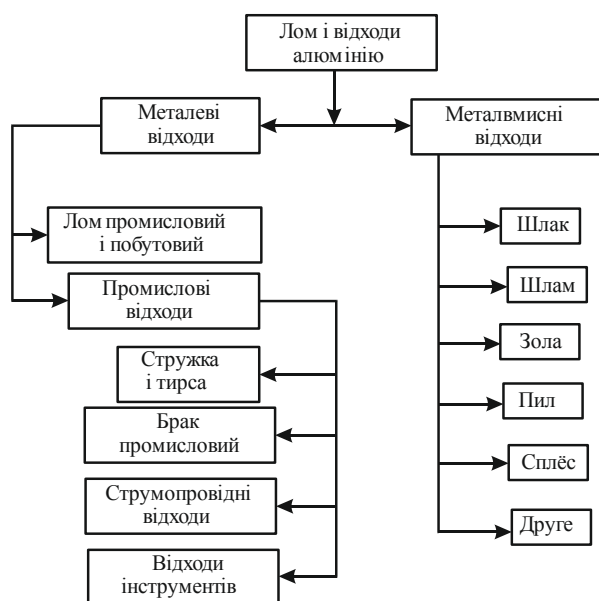


Рис. 3. Види вторинного алюмінієвого сировини [10]

Металургійна переробка брухту і відходів проводиться в різних металургійних печах. Завданням металургійного етапу є забезпечення максимального витягу алюмінію з підготовленого матеріалу. Плавку вторинного алюмінію виробляють в печах різної конструкції – в одно- або двокамерних печах з електричним і газовим нагріванням, а також в печах з індукційним нагріванням або в печах з магнітогідродинамічними пристроями.

В даний час широко використовуються роторні коротко барабанні печі з похилою віссю обертання. Обертання таких печей забезпечує хорошу змочуваність розплавом фрагментів брухту і перемішування розплаву з інтенсифікацією фізико-хімічних процесів.

Рафінування під шаром флюсу. Переробка вторинного алюмінію виконується під шаром рафінуючи флюсу, який захищає окислення розплаву, поглинає утворилися в результаті хімічної взаємодії оксиди і очищає розплав алюмінію. Матеріал флюсу вибирається таким, щоб він не вступав в хімічну взаємодію з футеровкою печі, з розплавом алюмінію, мав температуру плавлення нижче температури плавлення алюмінію і повинен був мати щільність нижче, ніж щільність розплаву алюмінію. Основним компонентом рафінуючи флюсу в даний час є суміш хлоридів натрію і калію ($\text{NaCl} + \text{KCl}$) і кріоліту – Na_3AlF_6 . Модель механізму рафінуючи дії флюсу можна досить наочно представлена в роботі [11].

Після створення в печі розплаву, на поверхню розплаву завантажується флюс. Новоутворена на поверхні розплаву оксидна плівка покривається флюсом і поглинається їм. Наявні в розплаві неметалеві включення обволікаються флюсом спливають і також поглинаються флюсом. Спливаючи, неметалеві включення захоплюють з собою і частинки (краплі) розплаву алюмінію і флюс наповнюється краплями алюмінію, і переходить вже в шлак.

Після витримки, розплав зливається з плавильної ванни, а шлак, збагачений алюмінієм, направляється на додаткову переробку з метою вилучення алюмінію. Відповідно до даних роботи [12], вміст

алюмінію в шлаках може досягати 60 % від кількості шлаку після процесу рафінування. Такий шлак є додатковим джерелом надходження алюмінію при переробці вторинного алюмінію. Гідністю такого методу є простота виконання технологічної процедури, але не забезпечується повнота витягу алюмінію, що є недоліком процесу

На даний час в промисловості застосовуються багато розроблених методів і способів переробки алюмінієвого шлаку. До них можна віднести кислотно-лужний способи [13], сульфатний спосіб виробництва сульфату алюмінію $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ для водоочищення та обробки питних і промислових вод [5, 14–16], електродугової переплав алюмінієвого шлаку в однофазної електродугової печі змінного струму [17].

Переробка алюмінієвих шлаків. Зростаючий попит на алюміній і його сплави обумовлює пошук шляхів поповнення його запасів шляхом більш ефективного та економічного вилучення алюмінію, як з бідних шлаків, так і шляхом переробки алюмінієвої сировини з високим відношенням площі поверхні до ваги. Наприклад, при обробці деталей утворюється стружка, вага якої становить від 3 до 10 % від загальної маси оброблюваних деталей. Стружка, має невелику щільність в порівнянні з розплавом металом, і ця обставина ускладнює її переплавку через швидке окислення стружки при контакті з гарячим повітрям.

Також вимагають глибокої переробки алюмінієві шлаки, які у вигляді так званих зборів накопичуються при первинному отриманні алюмінію. Залежно від вмісту в них частки алюмінію збори класифікують як пінки – вміст алюмінію $>45\%$ або як дроси – вміст алюмінію $<45\%$.

Ще одна група алюмінієвих шлаків утворюється при вторинному виробництві алюмінію з алюмінієвого скрапу, а саме, в даному випадку ще в більшому обсязі. Оскільки в рамках процесів, що використовуються для отримання вторинного алюмінію, додаються соляні суміші, що складаються з NaCl і KCl , відбувається утворення так званих алюмінієвих соляних шлаків, в яких також містяться регеновані частки алюмінію.

Значний обсяг алюмінієвих шлаків утворюється на ливарних підприємствах, що працюють за технологією бесфлюсової плавки алюмінієвих сплавів. Шлаки можуть містити від 20 до 80 % металу. Фактично вони представляють збори, які складаються з суміші металу, і оксидів. Сюди також можна віднести настил з розливних ковшів і піну, що утворюється при переливанні алюмінію.

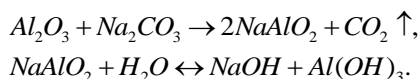
Як показано вище, легкий алюмінієвий брухт важко ефективно плавити, і він дуже легко окислюється. Незахищені розвинені алюмінієві поверхні швидко окислюються на повітрі навіть при температурі навколишнього середовища. При впливі високих температур, процес окислення значно прискорюється. Тому, однією з найбільш поширених технологій переробки алюмінієвих відходів є процес, пов'язаний із захистом алюмінієвого брухту від окислення, наприклад, зануренням роздробленої суміші в розплав алюмінію.

Способи та апарати, що реалізують цю технологію, наведені в роботах [18–20]. Однак, описані в

них технологічні прийоми ефективні для алюмінієвих відходів, що містять не більше 7 % оксидів, наприклад, таких як алюмінієва стружка.

Содовий метод переробки шлаків. Для підвищення ефективності переробки шлаку в роботі [21] розглядається содовий метод, який заснований на температурно-залежних характеристиках хімічних реакцій за участю алюмінію.

Механізм цього процесу заснований на зміні валентного стану алюмінію від тривалентного до одновалентного і навпаки, в залежності від температури під час хімічної реакції.



Надалі гідрооксид алюмінію направляється на прожарювання, а отриманий глинозем – на електролітичне отримання чистого алюмінію. Перевагою содового методу є досить повне зв'язування алюмінію в стійку сіль - алюмінат натрію, що забезпечує на наступних етапах застосування добре відпрацьованих технологічних прийомів. Недоліком содового методу є утворення оксидів вуглецю та їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Метод пресування шлаків. У роботі [22] запропоновано метод пресування гарячих шлаків безпосередньо після забору їх з дзеркала плавильної печі. Згідно з розробленою технологією гарячий шлак завантажують в форму і здавлюють під пресом. Вичавлений розплав алюмінію стікає в ізложницю і твердіє. Для переробки отриманого після здавлювання залишку у вигляді спресованої кірки потрібні менші витрати. Однак, застосування зазначеного прийому лише частково вирішує проблему переробки алюмінієвих шлаків і зменшення їх частки. Метод також не дозволяє відокремлювати алюміній при переробці холодних шлаків. Метод пресування гарячого шлаку забезпечує підвищення продуктивності процесу і отримання чистого алюмінію. Однак повного вилучення алюмінію перешкоджає складна структура шлаку, яка утримує захоплені частинки рідкого алюмінію.

Електрошлаковий спосіб переробки шлаку. Відомий також спосіб переробки алюмінієвого шлаку [23] в електрошлаковій печі постійного струму, що має тигель з нижнім електродом в якості катоду і верхнім електродом в якості аноду. Кріоліт (Na_3AlF_6) і оксид алюмінію (Al_2O_3) завантажують в тигель електрошлакового печі і розплавляють, потім в отриманий рідкий розплав (електроліт) подрібнюють алюмінієвий шлак (механічна суміш Al_2O_3 і металевго алюмінію) і кріоліт, додаються порціями по мірі плавлення і розчинення їх в електроліті.

Витяг рідкого металу з алюмінію відбувається на дні тигля, в області катоду, а витяг вторинного шлаку у вигляді суміші кріоліту і глинозему відбувається в області аноду. Таким чином, застосування електрошлакової печі забезпечує плавлення і розчинення алюмінієвого шлаку при температурі в діапазоні від 800 до 2000 °C. Застосування електрошлакового перепау для переробки алюмінієвих відходів не пов'язане з використанням з'єднань, що містять

хлор та фтор, і в цьому відношенні електродугові печі, є найбільш переважними.

Переробка шлаку в електродуговій печі. Для переробки металевго брухту запропоновано також спосіб плавки в печі електродуги, описаний в роботі [24]. Процес передбачає електродугову піч, в якій міститься, щонайменше, один електрод, і є система для видування газу вниз в простір печі в околицях електрода. Порошок або дрібно гранульована тверда речовина вдувається в простір печі разом з газом. Крім того, система для видування газу вниз забезпечена спеціальними турбулізаторами. Їх наявність, на думку авторів, значно покращує роботу печі, однак, також, як і в інших відомих раніше конструкціях дугових печей, регулювання довжини електричної дуги проводиться шляхом переміщення електрода. У той же час, механічна інерція негативно впливає на стабільність горіння дуги і викликає аномальні поштовхи струмового навантаження.

Використання електротермічної установки для переробки шлаку. Для досягнення економічного і технологічного способу переробки алюмінієвих шлаків, поліпшення екологічної обстановки в процесі його вилучення розглядається спосіб переробки алюмінієвого шлаку в електротермічній установці, опис пристрою якої наведено нижче (рис. 4) [25].

Установка складається з плавильної накопичувальної печі 1, в якій накопичується і осереднюється розплавлений алюмінієвий сплав 19. Піч закривається тепло ізолюючою кришкою 2. Над плавильною накопичувальною піччю 1 розташовують збірний реакторний блок, який представляє електродугову вакуумну камеру 7. Блок електродугової вакуумної камери 7, складений з керамічного стакану 16 і сталевий планшайби 8. Стакан 6 герметично кріпиться до планшайби 8 і додатково ізолюється вогнетривкою ватою 6, що розташована усередині обичайки 5. Дно керамічного стакану 16 містить вбудовані вогнетривкі патрубки 3 і 18, які виконують функції трубопроводів.

Трубопровід 18 є першим нагнітаючим трубопроводом і на ньому встановлено нагнітаючий лінійний асинхронний статор 17, а трубопровід 3 є другим трубопроводом, який відкачує за допомогою лінійного асинхронного статора 4. У центральній частині електродугової вакуумної камери 7 встановлений електрод 10. Електроживлення на електрод здійснюється від однофазного силового трансформатора, вторинна обмотка якого приєднується одним кінцем до електрода, а другим контактує з розплавленим алюмінієм 19, який накопичується в печі 1. При роботі змінний струм від силового трансформатора може бути поданий на електрод 10 і пропущений по трубопроводах в розплав, що знаходиться в печі.

Зокрема, змінний струм може бути використаний для резистивного нагрівання потоку розплаву до температур, що становлять в межах інтервалу від ~1820 до ~2250 °C, для сприяння отриманню металевго алюмінію.

Для подачі шлакової маси 13 у внутрішній простір камери 7 на планшайбі 8 змонтований електромеханічний шнековий дозатор 11. Завантаження шлакової маси здійснюють в герметичний бункер 12,

і потім по трубопроводу 14 шлак надходить в шнековий дозатор. Зверху на планшайбі 8 встановлений датчик 9 газового тиску, який дозволяє контролювати газовий тиск всередині камери 7. Регулювання величини газового тиску всередині електродугової камери здійснюють за допомогою електромагнітного клапана 15 пов'язаного з цеховою системою відкачування вакууму.

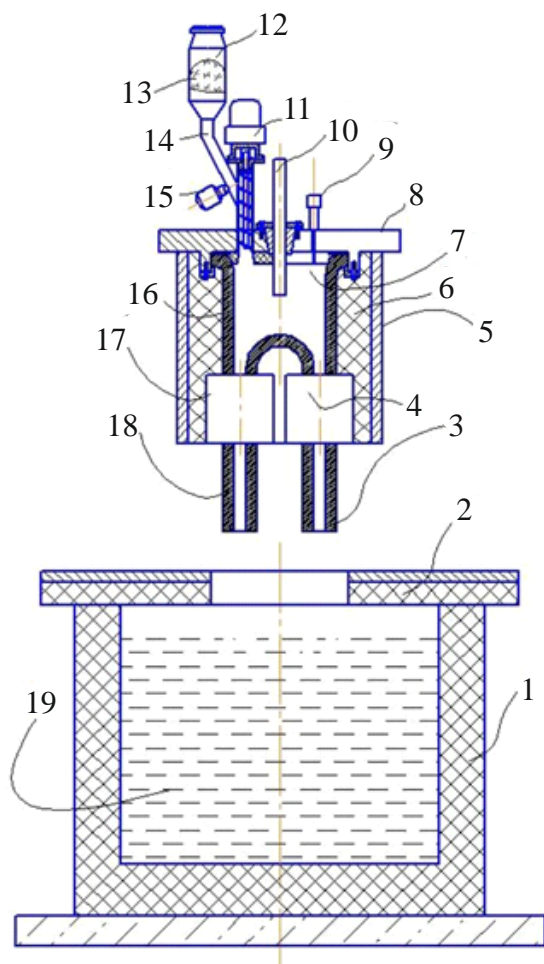


Рис. 4. Схема установки для отримання алюмінію з ливарного шлаку і відходів: 1 – плавильна накопичувальна піч; 2 теплоізолююча кришка; 3 і 18 – вогнетривкі патрубки; 4 – відкачує лінійний асинхронний статор; 5 – обичайка; 6 – вогнетривка вата; 7 – електродугове вакуумна камера; 8 – сталевая планшайба; 9 – датчик; 10 – электрод; 11 – электромеханический шнековый дозатор; 12 – герметичный бункер; 13 – шлаковая масса; 14 – трубопровод; 15 – электромагнитный клапан; 16 – керамический стакан; 17 – нагнетает линейный асинхронный статор; 19 – расплав алюминиевого сплаву;

Процес переробки алюмінієвого шлаку в електротермічною установці здійснюють наступним чином.

Перед початком роботи модуль електродугової камери 7 опускають на кришку 2, при цьому кінці трубопроводів занурюються в розплавлений алюміній, що знаходиться в печі 1 (рис. 5). Після занурення

трубопроводів в розплав включають систему відкачування газу і за допомогою датчика 9 контролюють величину тиску всередині робочого простору електродугової камери.

У процесі зниження газового тиску всередині камери 7 розплавлений метал піднімається по трубопроводах у внутрішній простір камери, потоки розплаву всередині камери зливаються, і при цьому формується замкнутий гідравлічний контур 20. Для дотримання умов підтримки довжини електричної дуги 21 між електродом і поверхнею розплавленого металу, в процесі всмоктування розплаву з печі, безперервно управляють і підтримують необхідну величину газового тиску всередині камери.

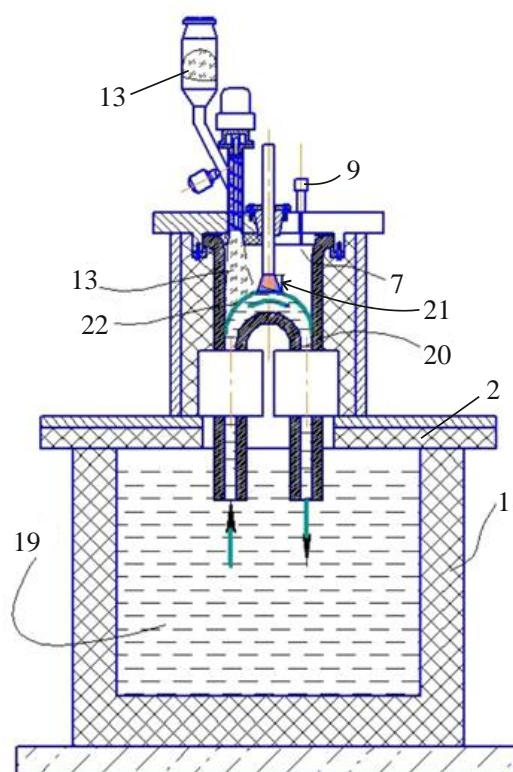


Рис. 5. Схема, що працює установки для отримання алюмінію з ливарного шлаку і відходів: 1 – плавильна накопичувальна піч; 2 теплоізолююча кришка; 7 – електродугове вакуумна камера; 9 – датчик; 13 – шлаковая масса; 19 – расплав алюминиевого сплаву; 20 – замкнутый гидравлический контур; 21 – электрическая дуга; 22 – поверхность алюминиевого расплаву

Після того як розплав алюмінію піднявся в камеру на необхідну висоту і зафіксовано необхідну відстань 21 см між кінцем електроду і поверхнею розплаву включають лінійний асинхронний статор 17 і одночасно відкачує лінійний асинхронний статор 4. Під дією електродинамічних сил, що наводяться лінійними статорами в гідравлічному контурі 20 між піччю і електродуговою камерою, порушується кругова циркуляція розплаву. Після порушення циркуляції розплаву, включають електричну дугу і на поверхню алюмінієвого розплаву здійснюють подачу шлаку 13 для його переробки. Під дією потоку розплаву шлак 13 переміщується в зону горіння дуги.

При переміщенні шлакової маси через зону горіння дуги висотою 21 см досягається її прогрів. Крім того, відбувається безперервне оновлення шлакової маси під електродом, де протікають основні фізико-хімічні процеси виділення алюмінію з шлаку. Одним з основних процесів, що сприяють виділенню алюмінію з шлаку, є катодного розпилення оксидних плівок на поверхні шлаку, що розвивається при впливі на нього електричної дуги змінного струму.

Крім цього, в дуговому проміжку розвивається процес безпосереднього відновлення металевго алюмінію з його оксидів присутніх в шлаку. У процесі горіння електричної дуги для досягнення найбільшої ефективності регулюють її довжини шляхом зміни газового тиску в електродуговій камері. При регулюванні тиску всередині камери змінюється висота розташування розплаву і відповідно змінюється довжина горіння електричної дуги.

Крім вигоди від розподілу струму при використанні процесу регулювання довжини дуги шляхом наближення або віддалення поверхні розплаву можуть бути також реалізовані й інші переваги. Наприклад, оскільки розплав здатний рухатися в напрямках вгору – вниз (наприклад, за допомогою зміни газового тиску всередині камери), то вертикальний рух інтенсифікує перемішування розплавленої ванни, що містить шлак в зоні горіння дуги.

Перевагою застосування електротермічною установки є висока ефективність відновлення алюмінію з шлаку, а також висока продуктивність процесу переробки досягається за рахунок підтримки циркуляції розплавленого металу між електродуговою камерою і накопичувальної піччю і крім цих факторів додаткового впливу на шлак високих температур в зоні горіння дуги. Установка може експлуатуватися в межах інтервалу температур від ~1910 до ~1940 °C для вилучення вуглецю з отриманого металевго алюмінію. Під час роботи установки забезпечується захист

робочого простору в зоні роботи обслуговуючого персоналу. В результаті різні гази відкачуються водокольцевим вакуумним насосом і пропускаються через систему очищення газів.

6. Висновки

Таким чином, процес виробництва первинного алюмінію є енергоємним і вимагає значних економічних витрат. У той же час при переробці вторинної алюмінієвої сировини витрачається всього 5 % енергії для переробки рудної сировини, що забезпечує інтенсивний розвиток технологій.

1. При використанні методу рафінування під шаром флюсу досягається простота технологічного процесу, але не забезпечується повнота витягу алюмінію, що є недоліком процесу

Перевагою содового методу є досить повне зв'язування алюмінію, але утворення оксидів вуглецю та їх негативний вплив на навколишнє середовище є недоліком.

Метод пресування гарячого шлаку забезпечує підвищення продуктивності процесу і отримання чистого алюмінію. Однак повного вилучення алюмінію перешкоджає складна структура шлаку, яка утримує захоплені частинки рідкого алюмінію.

Електрошлаковий переплав не пов'язане з використанням з'єднань, що містять хлор та фтор, і в цьому відношенні електродугові печі, є найбільш переважними.

При переробці шлаку в електродуговій печі механічна інерція переміщення електродів негативно впливає на стабільність горіння дуги і викликає аварійність технологічного процесу.

2. Найбільш доцільним є використання електротермічною установки, коли досягається висока ефективність і продуктивність відновлення алюмінію зі шлаку, а також забезпечується захист робочого простору в зоні роботи обслуговуючого персоналу.

Література

1. Алюминий. Wikipedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D0%B9> Дата обращения: 28.07.2019.
2. Бредихин, В. Н., Корицкий, Г. Г., Кушнеров, В. Ю., Шевелев, А. И. (2019). Алюминий вторичный. Донецк: ДонНТУ, 444.
3. Анализ мирового рынка алюминия: итоги 2017 года, прогнозы на 2018 год до 2021 года. Available at: http://www.talco.com.tj/sites/default/files/_world-aluminum-industry/Analiz_mirovogo_rinka_2017_prognoz_2018_do_2021.pdf Дата обращения: 25.07.2019
4. Чернавина, Д. А., Чернавин, Е. А., Фаллер, А. В., Зданович, М. Ю. (2018). Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы. Молодой ученый, 17, 206–210.
5. Савицкий, К. В. Переработка шлаков вторичного алюминия. Available at: http://www.rusnauka.com/SND/Tecnic/1_savickiy%20k%20v.doc.htm Дата обращения: 02.08.2019
6. Markets for Steel and Aluminum Scrap (2019). Available at: <https://www.spotlightmetal.com/markets-for-steel-and-aluminum-scrap-a-789883/>
7. Технологические схемы переработки лома и отходов алюминия. Available at: <https://uchebnikfree.com/ekologiya/tehnologicheskie-shemyi-pererabotkiloma-62897.html> Дата обращения: 30.07.2019
8. Вторичное сырье цветных металлов. Available at: <https://metallurgy.zp.ua/vtorichnoe-syre-tsvetnyh-metallov/> Дата обращения: 30.07.2019
9. О мировой алюминиевой промышленности на сайте РУСАЛа (2013). Available at: <https://iv-g.livejournal.com/930562.html> Дата обращения: 01.08.2019
10. Вторичное сырье цветных металлов (2019). Available at: <https://metallurgy.zp.ua/vtorichnoe-syre-tsvetnyh-metallov/> Дата обращения: 01.08.2019
11. Галушко, А. М., Королев, С. П., Трибушевский, В. Л., Михайловский, В. М., Трибушевский, Л. В., Шешко, А. Г., Королев, М. С. (2018). Некоторые особенности технологии и организации рециклинга алюминия и его сплавов. Литье и металлургия, 1-2 (54-55), 122–127.

12. О повышении эффективности производства вторичных алюминиевых сплавов. Available at: https://ukrbascompany.at.ua/index/o_povyshenii_ehffektivnosti_proizvodstva_vtorichnykh_aljuminievykh_splavov/0-135 Дата обращения: 01.08.2019.
13. Алюминий из шлаковых съёмов плавильных печей. Available at: <https://uchebnikfree.com/obrabotka-metallov-metallurgiya/alyuminiy-shlakovyih-syemov-plavilnyih-43700.html> Дата обращения: 02.08.2019
14. Прессы для переработки алюминиевого шлака. Available at: <http://www.lmltd.ru/altek/produktiya/otzhim-alyuminievogo-shlaka.html> Дата обращения: 25.07.2019
15. Зверева, Я. Ю. Переработка алюминиевых шлаков. Available at: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/26049/1/%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B0.pdf> Дата обращения: 29.07.2019
16. Савко, А. В., Кушнер, Е. Н. Эффективная технология переработки алюминиевых шлаков. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/13150/%D0%A1.%2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Дата обращения: 02.08.2019
17. Радченко, В. Г., Шабалин, В. Н., Трашков, К. М., Душаткин, В. И., Широков, И. С. (2003). Переплав алюминиевых шлаков в электродуговой печи. Ползуновский альманах, 4, 78–79.
18. Al Chalabi, R., Perry, O. H. (2009). Pat. WO2010/058172 World Intellectual Property Organization. МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; F 27 В 3/00. Metal melting apparatus. PCT/GB2009/002709; declared: 19.11.2009; published: 20.11.2009.
19. Pat. JPH03120322 JPN (1991). Device for melting aluminum swarf. МПК: С 22 В 21/00. published: 22.05.1991.
20. Pat. CA2977480 CA (2015). System and method for melting light gauge metal stock. МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; С 22 В 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. published: 12.11.2015.
21. Верховлюк, А. (2019). Процесс производства алюминия из отходов литейного производства. Международный форум по комплексному использованию ресурсов ванадия и титана в Паньчжихуа «Форум 2019». Паньчжихуа, 44.
22. Pat. 5882580 USA (1999). Dross presses. МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/04; С 22 В 7/00. published: 16.03.1999.
23. Pat. EP2331718 (2015). Electroslag melting method for reprocessing of aluminium slag. МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/04; С 22 В 9/18. published: 22.04.2015.
24. Pat. DE19517151 DEU (1996). Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability. МПК: С 21 С 5/46; С 21 С 5/52; F 27 В 3/08; F 27 В 3/22; F 27 D 13/00; F 27 D 99/00. published: 07.03.1996.
25. Verhovlyuk, A. M., Dovbenko, V. V., Chervonyi, I. F. (2019). Technological features of the processing of aluminum slag. International periodic scientific journal. Modern scientific researches, 9 (1), 9–18.

Received date 20.11.2019

Accepted date 11.12.2019

Published date 30.12.2019

Верховлюк Анатолій Михайлович, доктор технічних наук, професор, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів, Національна Академія Наук України, бул. Вернадського, 34/1, м. Київ, Україна, 03142
E-mail: vam@ptima.kiev.ua

Довбенко Володимир Віталійович, аспірант, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів, Національна Академія Наук України, бул. Вернадського, 34/1, м. Київ, Україна, 03142, директор, ТОВ «ПП «Укркабель», пер. Будівельний, 9/11, сел. Коцюбінське, Київська обл., Україна, 08298
E-mail: dovbenko@ukr.net

Червоний Іван Федорович, доктор технічних наук, професор, академік, Академія інженерних наук України, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: ivanchervony44@gmail.com